

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
EWERTON RAMOS PIRES
EDUARDO ALEXANDRE DE CARVALHO PRAZERES

**ANÁLISE DE UM VEÍCULO PROJETADO
AERODINAMICAMENTE VS CONVENCIONAL**

Taubaté – SP

2019

EWERTON RAMOS PIRES
EDUARDO ALEXANDRE DE CARVALHO PRAZERES

**ANÁLISE DE UM VEÍCULO PROJETADO
AERODINAMICAMENTE VS CONVENCIONAL**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Diploma do Curso de
Bacharelado em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia da
Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Leandro Maia Nogueira

Taubaté – SP

2019

SIBi - Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

P921a Prazeres, Eduardo Alexandre de Carvalho
Análise de um veículo projetado aerodinamicamente vs convencional
/ Eduardo Alexandre de Carvalho Prazeres, Ewerton Ramos Pires. –
2019.
41f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento
de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Leandro Maia Nogueira, Departamento de
Engenharia Mecânica.

1. Aerodinâmica. 2. Arrasto. 3. Carro. I. Pires, Ewerton Ramos. II.
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 629.8

Ficha catalográfica elaborada por Angela de Andrade Viana – CRB-8/8111

EDUARDO ALEXANDRE DE CARVALHO PRAZERES
EWERTON RAMOS PIRES

ANÁLISE DE UM VEICULO PROJETADO AERODINAMICAMENTE VS
CONVENCIONAL

Trabalho de Graduação apresentado
para obtenção do Certificado de
Graduação do curso de Engenharia
Mecânica do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
de Taubaté.

DATA: 04/12/2019

RESULTADO: APROVADO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Leandro Maia Nogueira

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

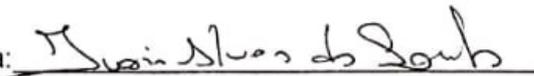
Assinatura: _____



Prof. Me. Ivair Alves dos Santos

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: _____



Eu, Ewerton Ramos Pires, dedico este trabalho a toda minha família, em especial, aos meus pais e meu irmão que estão todos os dias ao meu lado me dando carinho e me ajudando a dar os certos passos para fazer as escolhas corretas para minha vida.

À minha namorada Elisangela Aparecida Bastos Rosa e sua família por sempre me apoiar, me incentivar e acreditar em mim.

Finalmente, não menos importantes, aos meus amigos, meus irmãos da vida, que ajudaram a me tornar quem eu sou hoje.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.” –

Martin Luther King

“O importante não é a magnitude de nossas ações, mais sim a quantidade de amor que é colocada nelas.” –

Madre Teresa de Calcutá

“Eduque os meninos e não será preciso castigar os homens” - Pitágoras

“Amigos são a família que nos permitiram escolher” -

William Shakespeare

Eu, Eduardo Alexandre de carvalhos Prazeres, dedico este trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram em minhas escolhas acadêmicas.

Dedico a minha namorada Aline de Souza Santos por seu apoio e incentivo.

Finalmente, a todos meus amigos e familiares que proporcionaram que eu chegasse até aqui.

Os nossos pais amam-nos porque somos seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos de sucesso, isso pode parecer irrelevante, mas nas ocasiões de fracasso, oferecem um consolo e uma segurança que não se encontram em qualquer outro lugar.

(Bertrand Russell)

O amor faz-nos viver no futuro quando se é novo, no passado quando se é velho; e no céu durante um dia.

(Condessa Diane)

A cultura não se herda, conquista-se.

(André Malraux)

AGRADECIMENTOS

Eu, Ewerton Ramos Pires agradeço

À Deus pelo dom da vida.

À Universidade de Taubaté (UNITAU) pela oportunidade da realização deste Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao meu orientador Professor Leandro Maia Nogueira, por toda a confiança, atenção e orientação.

Aos meus pais e meu irmão que acreditaram em mim e me apoiaram durante todo o desenvolvimento da minha carreira universitária no Curso de Engenharia Mecânica.

Ao meu amigo e parceiro deste trabalho Eduardo Alexandre de Carvalho Prazeres, por toda disposição e ajuda necessária para a realização deste feito.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Eu, Eduardo Alexandre de Carvalho Prazeres

À UNITAU pela oportunidade da realização deste Curso de Graduação.

Ao meu orientador Professor Leandro Maia Nogueira, por toda a atenção e ensinamentos nesta área fascinante.

Aos meus pais que tornaram possível a realização deste Curso de Engenharia Mecânica.

Ao meu parceiro deste trabalho e amigo Ewerton Ramos Pires, por toda ajuda necessária para a realização deste feito.

A meu amigo Ewerton Ramos Pires por estar ao meu lado durante todos os anos deste curso.

RESUMO

Considerando a situação global atual, que impõe a sustentabilidade como critério fundamental para a continuação do crescimento econômico, torna-se necessário buscar alternativas de redução de consumo sem afetar o padrão no qual a sociedade está habituada a viver. Dentre as inúmeras possibilidades de redução do impacto ambiental que a engenharia demonstra existir através de pesquisas de desenvolvimento regularmente, o presente trabalho tem como foco, apresentar os benefícios que máquinas projetadas de forma aerodinâmica podem gerar para o meio ambiente, principalmente quando o combustível em questão é de origem fóssil. Quando objetos se encontram em movimento na superfície do planeta uma força de sentido contrário tende a resistir esse deslocamento, essa força depende do arrasto aerodinâmico que a superfície desses objetos proporciona no espaço, portanto, para que seja possível reduzir resistência a um deslocamento torna-se necessário estudar a relação entre as formas superficiais de um modelo em movimento na presença de ar atmosférico, e a ferramenta utilizada atualmente para estudar essas relações é chamada de túnel de vento. Os túneis de vento, são dispositivos que realizam a aceleração do ar atmosférico ao encontro de um protótipo, ou seja, realiza a simulação do objeto em movimento, e a através da análise de como esse ar escoar sobre a superfície desse modelo é possível mensurar as características de tais perfis aerodinâmicos. O objetivo do presente trabalho é estudar a interação entre a superfície do um veículo e ar em um túnel de vento, obter valores para coeficiente de arrasto aerodinâmico em veículos projetados aerodinamicamente e os não projetados e analisar os resultados obtidos.

Palavras-chave: Indústria automobilística, coeficiente de arrasto aerodinâmico, coeficiente de sustentação, túnel de vento, perfis aerodinâmicos.

ABSTRACT

Considering the current global situation, which imposes sustainability as a fundamental criterion for the continuation of economic growth, it is necessary to seek alternatives to reduce consumption without affecting the pattern in which society is used to living. Among the many possibilities for reducing environmental impact that engineering demonstrates to exist through regular development research, the present work focuses on presenting the benefits that aerodynamically designed machines can generate for the environment, especially when the fuel in question. It is of fossil origin. When objects are moving on the surface of the planet, a counter-direction force tends to resist this displacement, this force depends on the aerodynamic drag that the surface of these objects provides in space, so that it is possible to reduce resistance to a displacement. It is necessary to study the relationship between the surface shapes of a moving model in the presence of atmospheric air, and the tool currently used to study these relationships is called a wind tunnel. Wind tunnels are devices that perform the acceleration of atmospheric air to meet a prototype, that is, it simulates the moving object, and by analyzing how this air flows over the surface of this model, it is possible to measure the characteristics of such aero profiles. The objective of the present work is to study the interaction between the surface of a vehicle and air in a wind tunnel, to obtain values for aerodynamic drag coefficient in aerodynamically designed and non-designed vehicles and to analyze the results obtained.

Keywords: Automobile industry, aerodynamic drag coefficient, lift coefficient, wind tunnel, aerodynamic profiles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triciclo movido a molas e engrenagens	17
Figura 2 - Carro Benz Patent-Motorwagen	18
Figura 3 - Primeiro carro construído baseado em princípios aerodinâmicos.....	18
Figura 4 - Carro Rumpler-Troffenauto.....	19
Figura 5 – Bola de tênis em um túnel de vento	20
Figura 6 - Primeiro veículo com formato aerodinâmico.....	23
Figura 7 - Formatos aero fólicos e seus valores de coeficiente de arrasto.....	24
Figura 8 - Perfil de veículo proposto por Kamm	24
Figura 9 - Protótipo Chaparral 2E	26
Figura 10 - Características geométricas do modelo SAE	29
Figura 11 - Representação da forma geométrica do modelo em vista lateral.....	31
Figura 12 - Representação da forma geométrica do modelo SAE com ângulo de convergência igual a 15° em perspectiva	32
Figura 13 - Representação da forma geométrica do modelo SAE Híbrido fastback com ângulo de convergência igual a 50 em perspectiva.....	32
Figura 14 - Malha bidimensional triangular aplicada na superfície do modelo SAE.....	34
Figura 15 - Malha bidimensional triangular aplicada na superfície inferior do túnel de vento virtual	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores dos coeficientes de sustentação em função do ângulo de convergências	38
Gráfico 2 - Valores dos coeficientes de arrasto em função do ângulo de convergência	39
Gráfico 3 - Valores dos momentos de arfagem em função do ângulo de convergência	40
Gráfico 4 - Valores de centro de pressão em função do ângulo de convergência	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ângulos de convergência modelo SAE.....	30
Tabela 2 - Dimensões do modelo de testes utilizado na simulação computacional.....	33
Tabela 3 - Configuração utilizada no Fluent v12.1 para a simulação do experimento.....	36
Tabela 4 - Valores obtidos através da simulação realizada no tunel de vento computacional para o modelo SAE	37
Tabela 5 - Valores de coeficiente de arrasto em função do ângulo de inclinação do capô. ...	41

SUMÁRIO

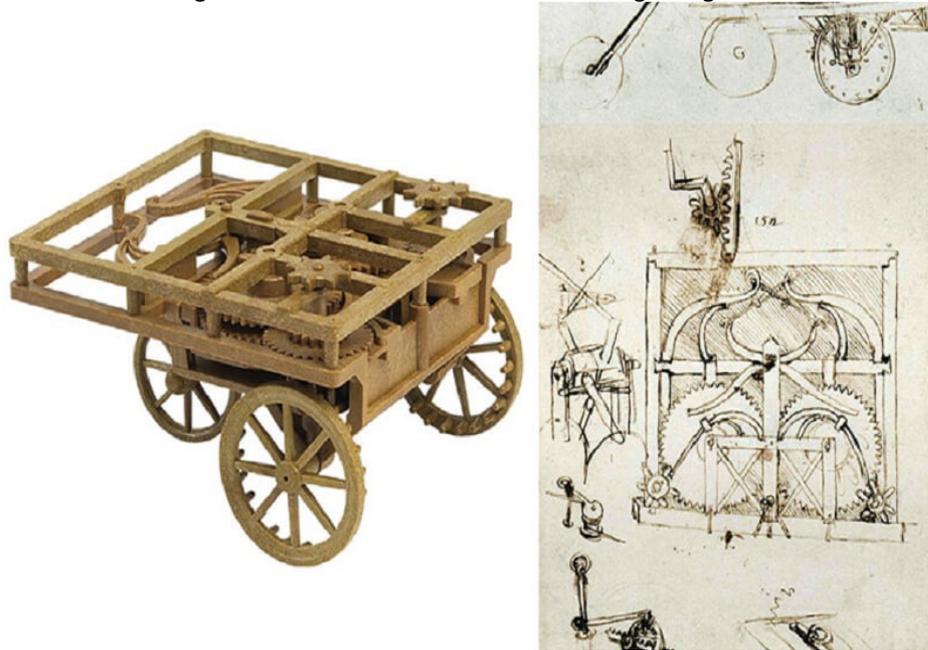
1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações Iniciais	17
1.2	Justificativa e objetivos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Histórico	22
2.2	Indústria automobilística	25
2.3	Túnel de vento.....	26
2.4	Arrasto aerodinâmico.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Metodologia	28
3.2	Análise geométrica.....	28
3.3	Caracterização do Modelo SAE	33
3.4	Simulação	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	Análise do arrasto veicular Modelo SAE	37
4.2	Análise do arrasto veicular Modelo SAE Híbrido fastback.....	41
4.3	Comparação dos resultados dos modelos SAE, Híbrido fastback e convencional.....	42
5	CONCLUSÕES.....	43
6	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A história dos automóveis começou a ser idealizada pelo famoso inventor Leonardo da Vinci, que no século XV projetou um triciclo movido a molas e engrenagens, mostrado na figura 1 (HISTORIADIGITAL, 2015), feito que ainda estava distante do que viria a ser o primeiro automóvel conhecido pela humanidade (DESPACHANTE, 2017).

Figura 1 - Triciclo movido a molas e engrenagens



Fonte: HISTORIADIGITAL, 2015

Existem algumas controvérsias sobre a data de invenção do primeiro carro, no entanto, registros mostram que em janeiro 1886 o engenheiro alemão Karl Friedrich Michael Benz registrou a patente DRP 37435 e em junho do mesmo ano apresentou o Benz Patent-Motorwagen, mostrado na figura 2 (DAMY, 2019), primeiro automóvel movido a gasolina do mundo. O veículo com três pneus, chassi de madeira, apenas um banco e um volante era o projeto apresentado por Benz e que já tinha motor de quatro tempos com um cavalo de potência e 16 km/h de velocidade máxima (DESPACHANTE, 2017).

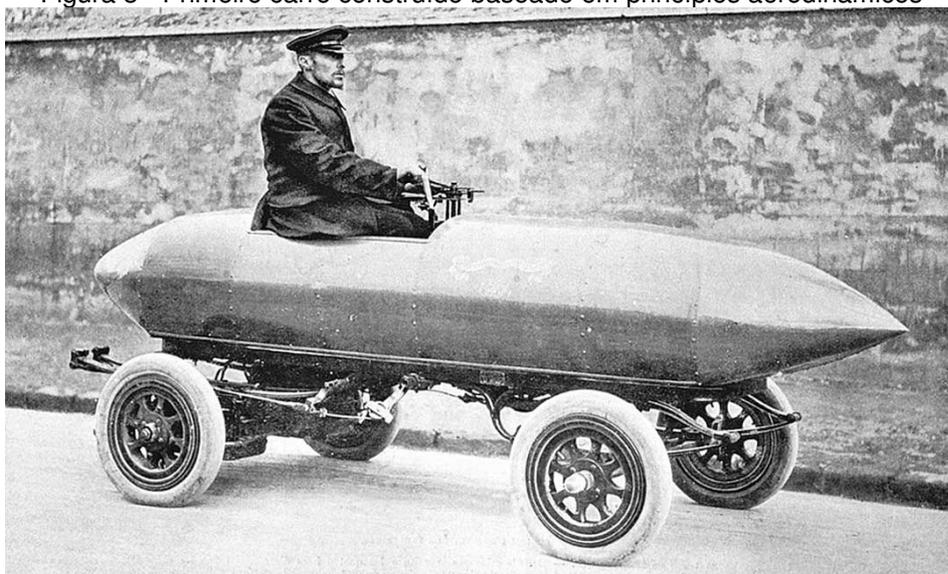
Figura 2 - Carro Benz Patent-Motorwagen



Fonte: DAMY, 2019

Dado início a história dos automóveis, inicia-se a busca pela qualidade no desempenho, dirigibilidade, segurança e conforto do automóvel, que são afetados significativamente por suas propriedades aerodinâmicas (HUCHO, 1998). No ano de 1899, Le Jamais Contente construiu o primeiro carro baseado em princípios aerodinâmicos e também o primeiro a ultrapassar a barreira dos 100 km/h, mostrado na figura 3 (THEOLDMOTOR, 2015).

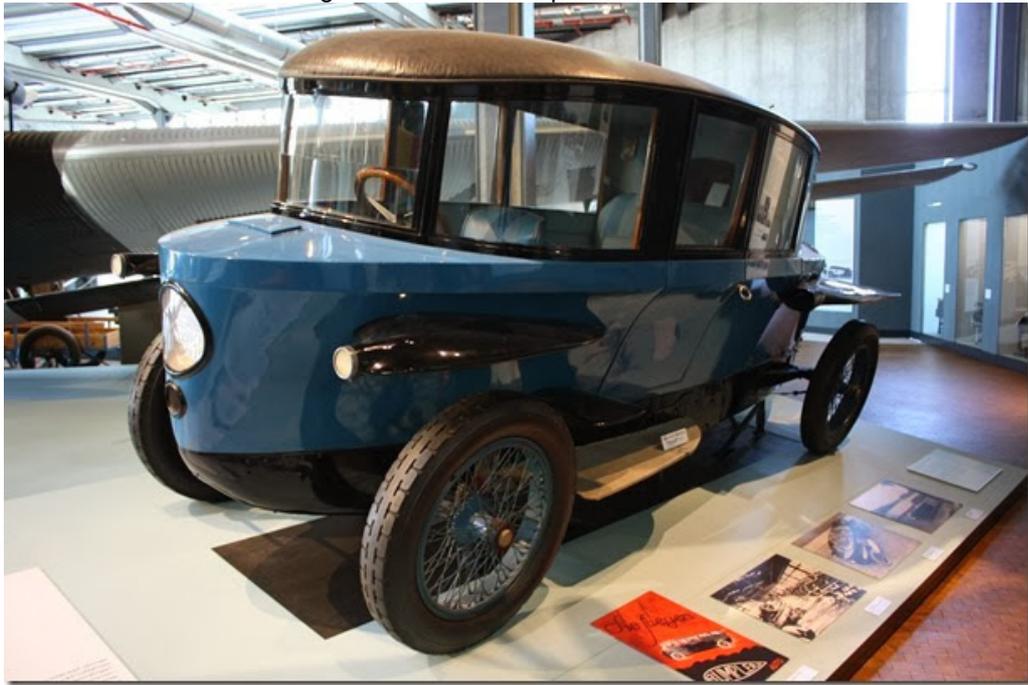
Figura 3 - Primeiro carro construído baseado em princípios aerodinâmicos



Fonte: THEOLDMOTOR, 2015

Em 1921, o inventor alemão Edmund Rumpler apresentou o automóvel Rumpler-Troffenauto, mostrado pela figura 4 (SOCIVIEWS, 2019), inspirado no formato mais aerodinâmico encontrado na natureza, a gota d'água. O seu projeto registrou um coeficiente de arrasto (C_x) de apenas 0,27, mesmo valor apresentado pelo carro de aerodinâmica futurista, Toyota Prius (CONTRAOVENTO, 2009).

Figura 4 - Carro Rumpler-Troffenauto



Fonte: SOCIVIEWS, 2019

A superfície aerodinâmica de um veículo é um ramo do estudo que está diretamente relacionado com o cenário histórico do petróleo. Desde a década de 70, durante a crise do petróleo, até os dias atuais, observam-se, aumentos no valor do barril deste combustível, oriundos de interesses políticos, crises e especulações financeiras. Sempre que ocorre um grande aumento do custo final dos combustíveis fósseis, a atenção é voltada para alternativas que visam a redução de consumo de combustível dos motores a combustão interna (CASTEJON, 2011).

Outro contexto que contribui, de forma significativa, para os avanços na aerodinâmica veicular é o da conscientização ambiental, este fator está cada vez mais presente na cultura dos seres humanos. Condição que demanda aos projetos atuais conciliarem eficiência e custo final afim de se obter uma aceitação satisfatória do mercado consumidor (CASTEJON, 2011).

Uma das soluções encontradas para tornar-se um projeto veicular mais eficiente energeticamente, está na aerodinâmica do automóvel, mais especificamente, o seu arrasto aerodinâmico. Termo que pode ser definido como a força gerada por um fluido que se contrapõe a progressão de uma massa no espaço, ou seja, quanto menor o arrasto aerodinâmico desta massa, menor será seu consumo energético para se obter um determinado deslocamento (CASTEJON, 2011).

A ferramenta utilizada para se fazer ensaios capazes de analisar a interação entre a superfície de um corpo e o ar, é máquina chamada túnel de vento, constituída por grandes tubos com ar que se move internamente (GHISLENE, 2015). O ar em movimento ao redor de um objeto simula que o mesmo se encontra em deslocamento no espaço, e dessa forma pode-se analisar de força que esse determinado corpo exerce para romper o ar estando em movimento, mostrado na figura 5 (GHISLENE, 2015).

Figura 5 – Bola de tênis em um túnel de vento



Fonte: GHISLENE, 2015

1.2 Justificativa e objetivos

Devido ao cenário atual de crescente política de conscientização ambiental imposto a sociedade pelos governos, ONGs e mídias, torna-se necessário focar em estudos que satisfaçam tal imposição. O trabalho tem como objetivo:

- Apresentar os benefícios com produtos projetados de forma aerodinâmica em relação e performance do produto, obtendo resultados significativos para o cenário desafiador atual.
- Obtenção dos valores para os coeficientes de arrasto aerodinâmico em veículos projetados de forma aerodinâmica versus convencional.
- Analisar os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

O século XX foi o período em que a indústria automobilística começou a dar os primeiros passos rumo a sua sólida introdução no mercado. Os automóveis produzidos naquela época ainda eram muito divergentes dos quais conhecemos hoje, embora movidos a motores de combustão interna, com baixíssimas eficiência e velocidade de deslocamento. Fato que não permitia o conhecimento do reduzido desempenho aerodinâmico da superfície dos automóveis (CASTEJON, 2011).

Ao mesmo tempo em que a indústria automobilística buscava sua inserção ao mercado, a indústria aeronáutica já caminhava a passos largos rumo ao seu desenvolvimento, as pesquisas no campo da aerodinâmica das aeronaves estavam começando a dar os resultados esperados (CASTEJON,2011).

O setor aeronáutico foi impulsionado de forma avassaladora pela Primeira Guerra Mundial, existiam muitos pesquisadores na corrida pelo desenvolvimento de equipamentos que fizessem o diferencial em uma batalha, e com o fim da guerra, ficaram muitos legados no ponto de vista do conhecimento e os cientistas formados nessa época começaram a migrar para a indústria automobilística (CASTEJON, 2011).

Se aproveitando dos estudos voltados para a aerodinâmica das aeronaves, a indústria dos automóveis começou a utilizar as mesmas técnicas para desenvolver seus projetos (HUCHO, 1998). Nessa época os veículos se aproximaram aos formatos de torpedos e aviões, acredita-se que Camille Jenatzy tenha sido a responsável pela fabricação do primeiro carro a ultrapassar a marca dos 100 km/h, mostrado na figura 6 (HUCHO, 1998).

Figura 6 - Primeiro veículo com formato aerodinâmico



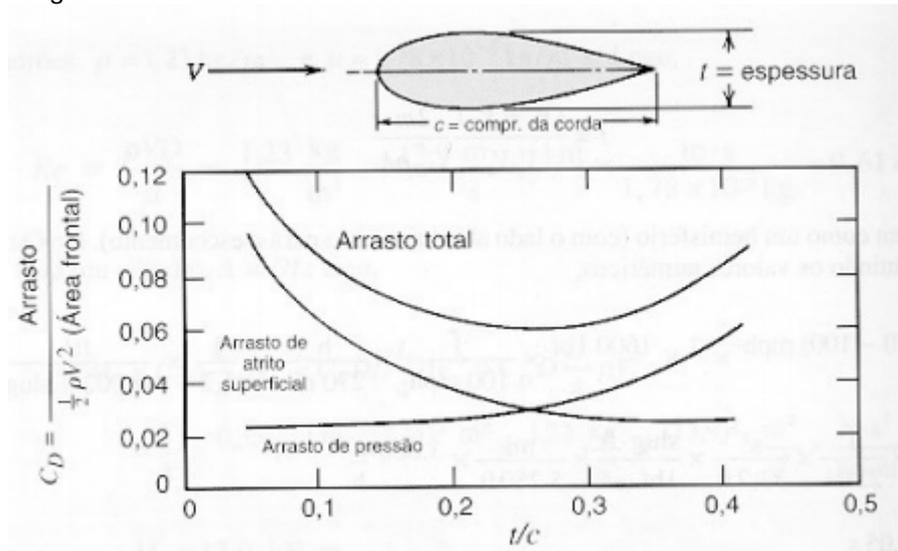
que
muito

Fonte: HUCHO,1998

Out
ro
estudioso
ganhou

destaque nessa época foi Paul Jaray, responsável por estudos voltados a aerodinâmica de corpos, descobriu formatos sólidos que posteriormente serviriam de base para os novos veículos projetados. Em parceria com Klemperer, foram autores de testes em tuneis de vento a fim de observar as reações do vento entre as superfícies do carro e do solo. Descobriram que um formato aerofólio, mostrado na figura 7 (FRANKLM, 2019), com coeficiente de arrasto (C_x) de 0,05 no ar, quando se aproxima do solo, altera seu valor para 0,09, e quando inseridos perfis circulares similares as rodas de veículos, o valor iria para 0,15. Resultado bem abaixo dos encontrados em veículos na época, que estavam entorno de 0,7 (HUCHO, 1998).

Figura 7 - Formatos aero fólicos e seus valores de coeficiente de arrasto

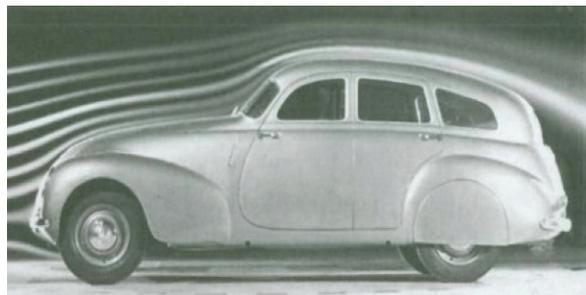


Fonte: FRANKLM, 2019

Embora a descoberta de Jaray fosse algo completamente inovador para a época, reduzindo em quase cinco vezes o coeficiente de arrasto dos veículos, o seu perfil não obteve aceitação de mercado. A forma geométrica do veículo necessitava de uma traseira muito alongada, fato que destoava dos veículos da época (CASTEJON, 2011).

Em torno de 1930, Wunibald Kamm trouxe um novo conceito aerodinâmico, um veículo semelhante ao de Jaray, porém com uma calda mais reduzida, como mostrado na figura 8 (HUCHO, 1998). O projeto de Kamm propunha que a partir da altura máxima do veículo, em direção a sua parte posterior, a curvatura das linhas deveriam se encontrar de forma suave, com o objetivo de manter a menor variação de pressão nessa região. Com esse novo conceito, foi possível se obter coeficientes de arrasto em torno de 0,3 e também formas de maior aceitação entre os consumidores (HUCHO, 1998).

Figura 8 - Perfil de veículo proposto por Kamm



Fonte: HUCHO, 1998

2.2 Indústria automobilística

Pode-se afirmar que as indústrias automobilística e automotiva caminharam unidas rumo aos avanços, embora o automobilismo fosse mais associado com a área esportiva. O progresso realizado por ambas era alcançado de forma conjunta, visto que as ferramentas projetadas pelo setor automotivo eram primeiramente testadas em situações de esforço solicitante demasiadamente altos, ou seja, nas pistas de corrida. Após estes ensaios severos, caso obtido sucesso, os sistemas desenvolvidos estavam aptos a serem implementados nos automóveis de consumo em massa (CASTEJON, 2011).

O propósito da busca por equipamentos de melhores desempenhos era único, quebra de recordes. Nas pistas, o equipamento é o foco do público fã de velocidade, ou seja, grande parte do marketing necessário de uma determinada marca se encontrava em função do desempenho nas corridas (CASTEJON, 2011).

Os conceitos oriundos das descobertas de Jaray e Klemperer passaram a ser utilizados nos veículos de alta performance, embora o mercado consumidor não tivesse demonstrado aceitação, nas corridas isso não era tido como um obstáculo. O ganho de desempenho na implementação das técnicas aerodinâmicas disponíveis na época compensava e muito a falta de estética das formas utilizadas (CASTEJON, 2011).

Nesse período toda a aerodinâmica presente nos carros de corrida era utilizada com a intenção de redução de arrasto aerodinâmico, o que permitia velocidades cada vez maiores, esse aumento das velocidades finais passou a gerar forças laterais provenientes do escoamento turbulento do ar ao entorno dos protótipos. Fato que tornou necessário a criação de perfis que compensassem a falta de estabilidade proporcionada pelas forças laterais geradas (CASTEJON, 2011). Um dos primeiros carros a utilizar perfil semelhante ao de lemes aeronáuticos foi o protótipo Chaparral 2E, como mostrado na figura 9 (TARINGA, 2019).

Figura 9 - Protótipo Chaparral 2E



Fonte: TARINGA, 2019

Esses novos perfis utilizados em carros de corrida buscavam o equilíbrio entre o coeficiente de arrasto e a força de sustentação negativa, enquanto o primeiro era encarregado de proporcionar eficiência e altas velocidades finais o segundo era responsável pela manutenção da dirigibilidade dos veículos (CASTEJON, 2011).

Por volta dos anos 70, o método chamado como Otimização de Formas, passou a ser incorporado aos veículos de alta performance. Esse modelo era baseado na razão entre C_l/CD , onde C_l é o coeficiente de sustentação e CD é o de arrasto, modificações eram realizadas nas superfícies aerodinâmicas do projeto, ensaios eram realizados e a partir do melhor desempenho obtinha-se a melhor relação entre C_l/CD (CASTEJON, 2011).

2.3 Túnel de vento

Durante as pesquisas sobre os métodos de “Otimização de Formas” por parte da indústria automotiva, tornou-se necessário a utilização de uma ferramenta até então exclusivamente aeronáutica, o túnel de vento, que foi partilhado entre os dois

setores até por volta dos anos 80. Dessa época em diante as pesquisas avançaram, e a indústria automobilística precisou desenvolver um túnel de vento que atendesse suas necessidades mais específicas no seu campo de estudo (KATZ, 1995).

Dentre os túneis de vento desenvolvidos pelo setor automobilístico, podemos classifica-los em duas categorias, os de circuito aberto e os de circuito fechado. Enquanto o primeiro capta o ar atmosférico, o acelera num duto convergente direcionado ao protótipo e o libera para a atmosfera após a passagem por um duto divergente que reduz sua pressão, o segundo reutiliza o mesmo fluido acelerado (KATZ, 1995). A vantagem do circuito fechado está no menor consumo energético, visto que o mesmo volume de ar se encontra em velocidade de deslocamento constante, não é necessário acelerá-lo como no circuito aberto, porém é preciso da manutenção de um trocador de calor afim de manter a temperatura do ar constante (HUCHO, 1998).

2.4 Arrasto aerodinâmico

Atualmente a sociedade se encontra em meio a apelos de proteção ao meio ambiente, forçando muitas indústrias tornarem seus produtos mais econômicos, dentre elas está a automobilística, sempre buscando projetos mais eficientes. O arrasto aerodinâmico é capaz de definir sobre o dimensionamento da superfície aerodinâmica de um veículo, quanto menor esse coeficiente, melhor dimensionado será o projeto, ou seja, mais eficiente (CASTEJON, 2011).

O coeficiente de arrasto é um número adimensional que efetua a medição da força de resistência ao movimento de uma massa no espaço, exercida por um fluido, no caso dos veículos o ar atmosférico, esse coeficiente é definido pela Eq. 1.

$$Cx = \frac{Fa}{A \times 0,5 \times p \times V^2} \quad (1)$$

Onde, F_a é a força de arrasto, A é a área de referência, p é o peso específico do fluido e V é a velocidade de deslocamento do veículo em relação ao fluido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

O processo experimental do trabalho foi baseado numa sequência de passos, já mencionadas no item 1.2 – Justificativa e Objetivos. A fim de facilitar o entendimento é apresentado de forma sucinta cada passo proposto pelo presente trabalho, são elas:

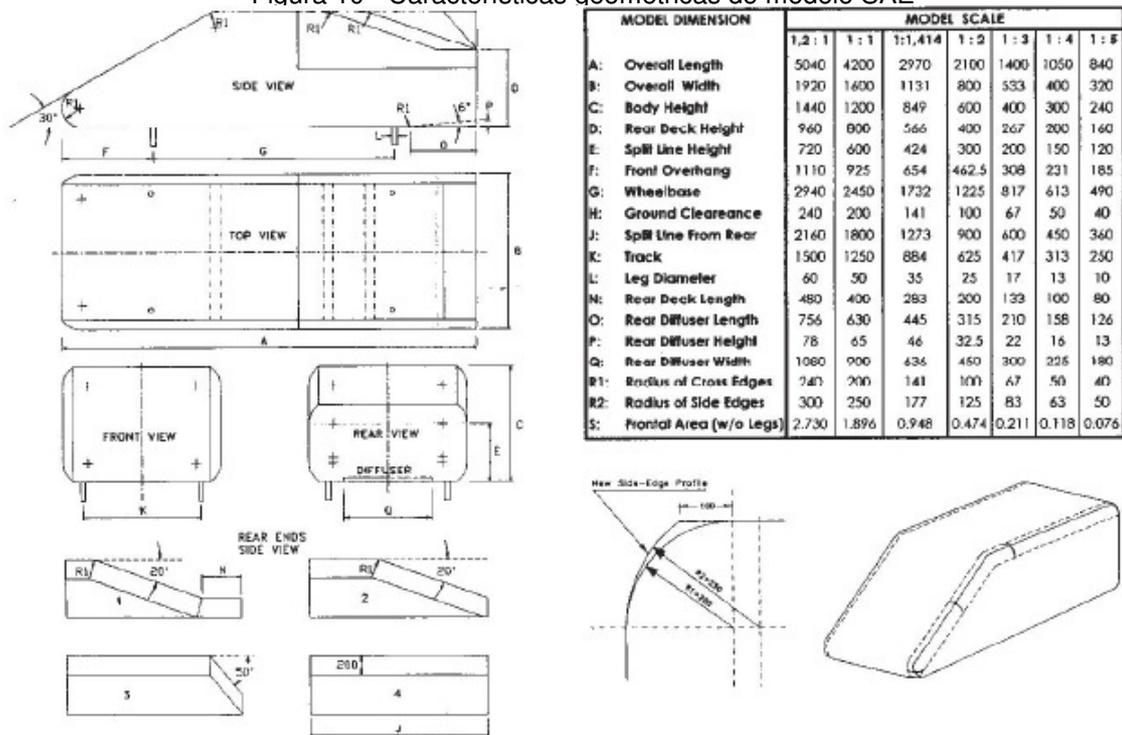
- Apresentar os benefícios com produtos projetados de forma aerodinâmica em relação e performance do produto, obtendo resultados significativos para o cenário desafiador atual.
- Obtenção dos valores para os coeficientes de arrasto aerodinâmico em veículos projetados de forma aerodinâmica versus convencional.
- Analisar os resultados obtidos.

3.2 Análise geométrica

O arrasto aerodinâmico é gerado principalmente pela pressão atmosférica do ar. Este tipo de fenômeno é resultante de vórtices que se formam na camada superficial do veículo em movimento, afim de reduzir este surgimento modifica se o formato da traseira do veículo, fazendo com que o ar escoe de forma laminar por sobre o mesmo.

Na análise foram utilizadas as geometrias nomeadas Modelo SAE e Modelo SAE Híbrido *fastback*, partindo de formatos mais básicos para o primeiro, ou seja, não projetados aerodinamicamente, para modelos mais elaborados e um modelo fixo para o segundo com ângulo de convergência de 50°. Porém estas formas desde a mais básica até a mais complexa são de fácil construção de réplicas em softwares computacionais. A figura 10 apresenta características dos modelos SAE e Híbrido *fastback* mencionados.

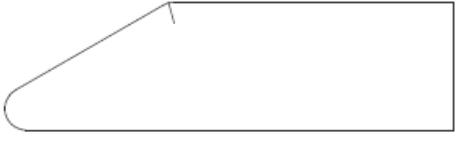
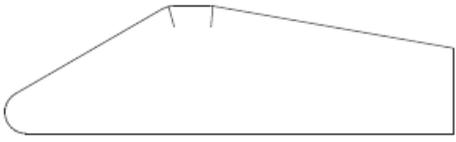
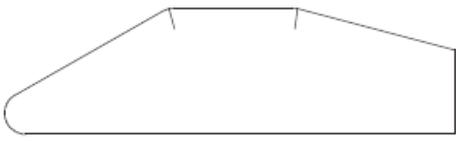
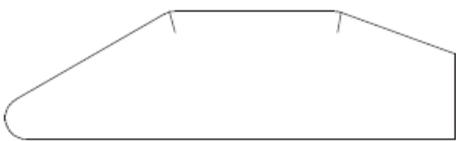
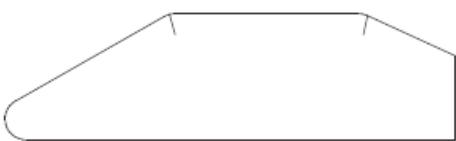
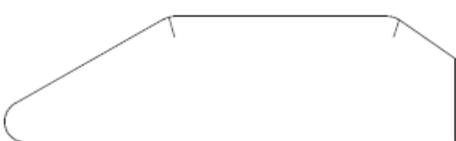
Figura 10 - Características geométricas do modelo SAE



Fonte: (SAE PAPER, 2004).

Para o modelo SAE foram adotados 6 configurações para estudo, e variam de acordo com o ângulo de convergência da parte superior do veículo, mostrado pela tabela 1.

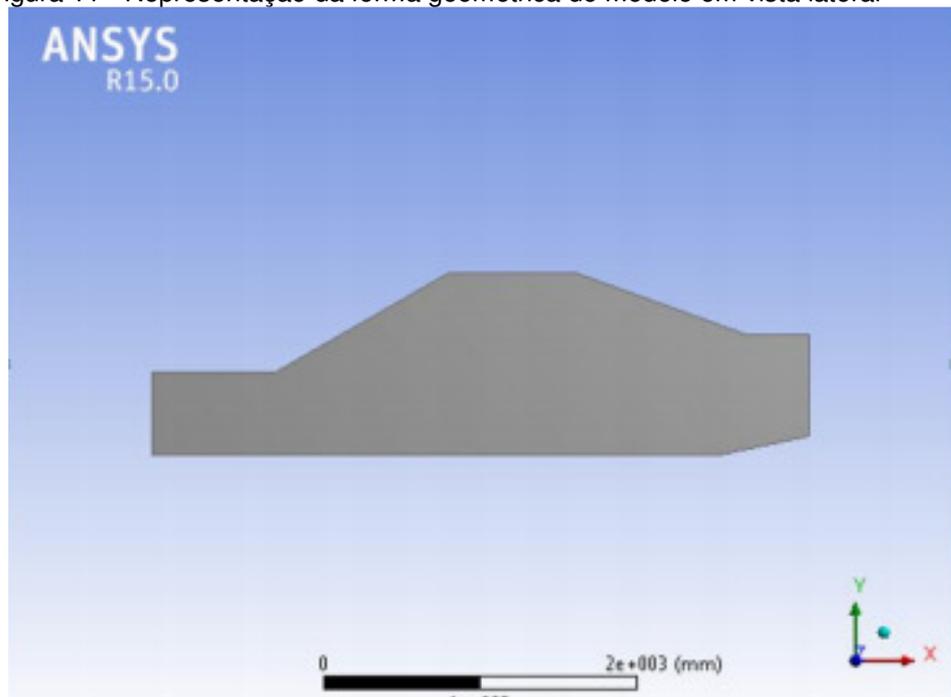
Tabela 1 - Ângulos de convergência modelo SAE

	0° de convergência
	10° de convergência
	15° de convergência
	20° de convergência
	25° de convergência
	35° de convergência

Fonte: os autores

E para o modelo SAE Híbrido *fastback* foi adotado uma configuração para estudo, mostrado pela figura 11.

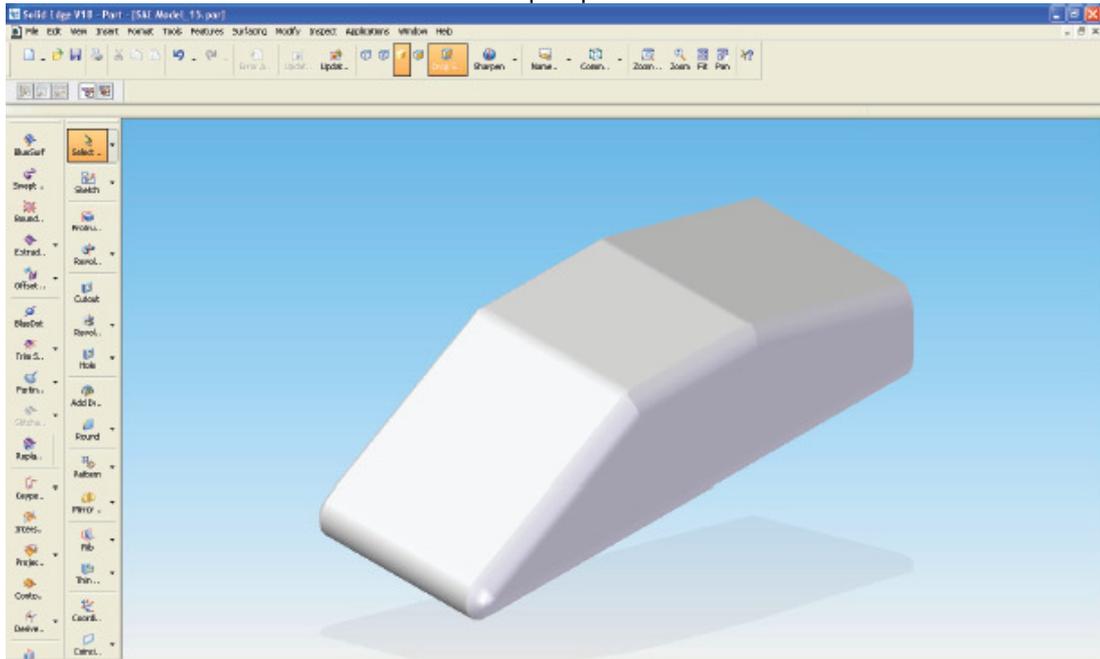
Figura 11 - Representação da forma geométrica do modelo em vista lateral



Fonte: ANSYS v.15, 2019

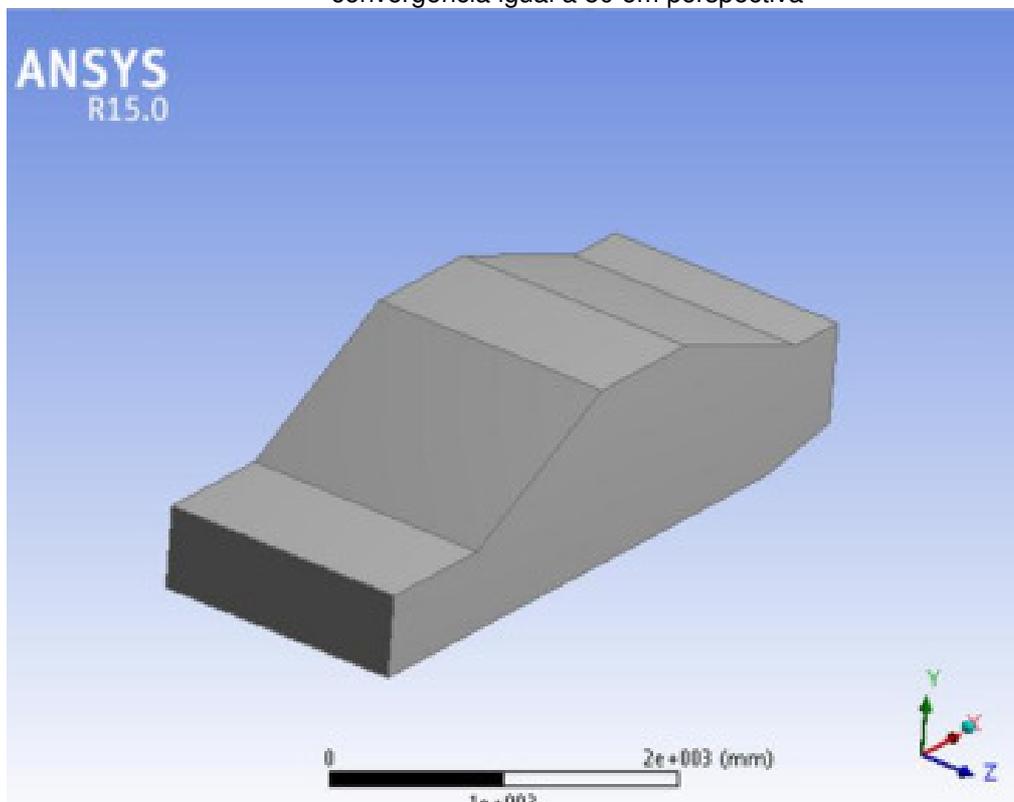
A fim de se obter um número de Reynolds mais perto das condições reais, o método SAE especifica algumas escalas que podem ser utilizadas na fabricação dos modelos, para o presente estudo foi utilizada a escala 1:4. A partir desta condição foram criados os modelos computacionais no software Solid Edge v.18 e Ansys r.15, o modelo com ângulos de convergência iguais a 15° e 50° são mostrados pelas figuras 12 e 13.

Figura 12 - Representação da forma geométrica do modelo SAE com ângulo de convergência igual a 15° em perspectiva



Fonte: SOLID EDGE v.18, 2019.

Figura 13 - Representação da forma geométrica do modelo SAE Híbrido fastback com ângulo de convergência igual a 50 em perspectiva



Fonte: ANSYS r.15, 2019.

3.3 Caracterização do Modelo SAE

Afim de caracterizar o modelo adotado foi criado um volume de controle com dimensões similares a testes reais em tuneis de vento, seguindo as especificações da norma SAEJ2071. Foram adotados então os seguintes valores para o volume de controle:

- Razão de bloqueio = 0,050;
- Razão largura do protótipo x altura protótipo = 1,333;
- Comprimento do túnel a frente do veículo = 2 vezes o comprimento do protótipo;
- Comprimento do túnel atrás do veículo = 4 vezes o comprimento do protótipo;
- Razão altura túnel x altura protótipo = 4,444;
- Razão largura túnel x altura túnel = 1,333;

A partir destes critérios adotados, foram obtidos os seguintes dados apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões do modelo de testes utilizado na simulação computacional

Dimensionais do experimento:	Valor	Unidade de medida
Altura do protótipo	0,300	m
Largura do protótipo	0,400	m
Razão de aspecto do protótipo	1,333	-
Razão de bloqueio	0,050	-
Área da seção transversal do protótipo	0,118	m ²
Área da seção transversal do túnel	2,370	m ²
Altura do túnel	1,333	m
Largura do túnel	1,778	m
Razão de aspecto do túnel	1,333	-

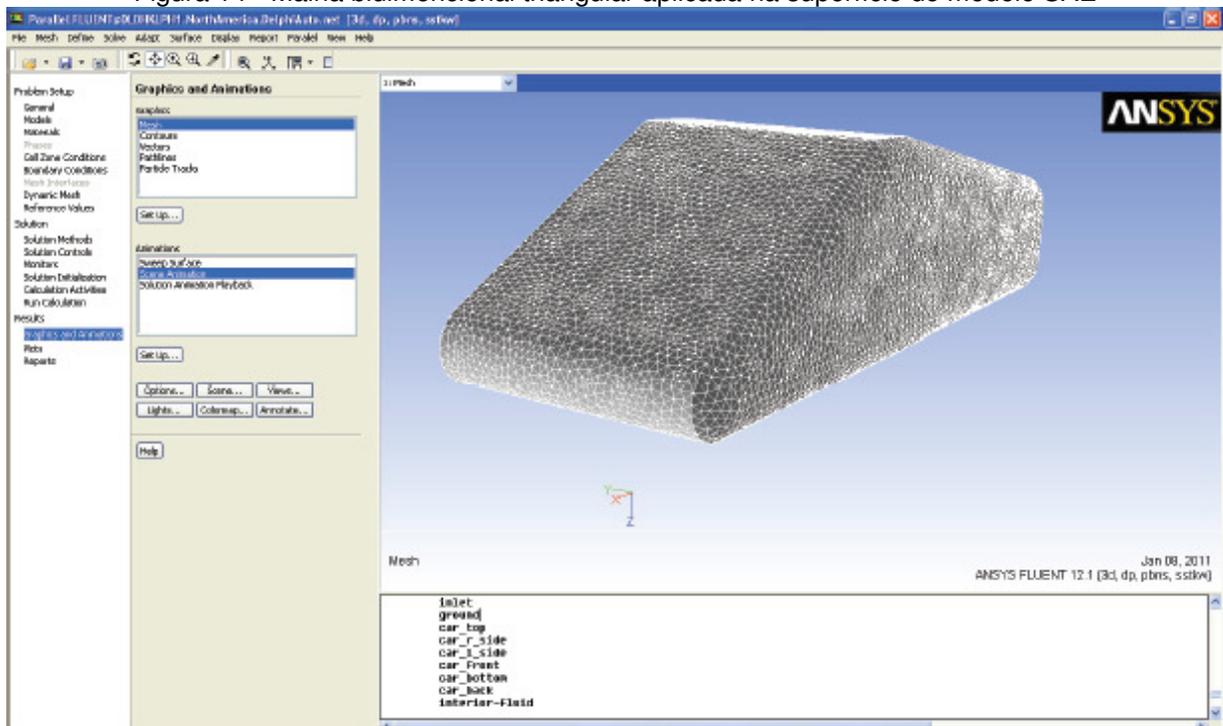
Fonte: os autores

Foi criado o volume de controle mostrado na figura 3.3, com as características da tabela 3.2 e desconsiderando o volume do protótipo, para que análise seja feita somente do escoamento relativo a parte externa do mesmo, desprezando qualquer escoamento pertinente ao volume interno do veículo.

Sobre a malha criada no software Meshing, foi adotado o modelo triangular nas superfícies do protótipo e de túnel, e para a malha volumétrica foi adotado o formato tetraédrico. O intuito ao adotar esses padrões triangulares foi de facilitar o estudo de regiões pontuais durante os testes.

As análises pontuais foram destinadas as regiões críticas próximas a superfície do veículo, dentro do volume de controle, ou seja, onde apresentaram-se variações de escoamento laminar para turbulento. Para esse refino do estudo nessas regiões foram seguidas as condições impostas pelo método de turbulência acerca das dimensões dos pontos em análise, mostrado nas figuras 14 e 15.

Figura 14 - Malha bidimensional triangular aplicada na superfície do modelo SAE



Fonte: ANSYSFLUENT, 2019.

Tabela 3 - Configuração utilizada no Fluent v12.1 para a simulação do experimento

Tipo de escoamento	Tridimensional
Método de solução utilizado	N-S, <i>Pressure-based</i> , com dupla precisão
Formulação da Velocidade	Absoluta
Regime de solução	Permanente
Intensidade de turbulência	0,5%
Modelo de turbulência	SST k-w
Composição do escoamento	Fluido – ar (única fase): T = 288,15 K, P = 101,325 KPa, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$, $\gamma = 1,4$
Métodos de solução espacial	Acoplamento Pressão – Velocidade: SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), Gradiente: Mínimos Quadrados, Pressão: padrão, Momento: 1° Ordem Upwind, Taxa de dissipação específica (w): 1° Ordem Upwind
Fatores de relaxação	Pressão: 0,3, Densidade: 1, Força: 1, Momento: 0,7, Energia cinética turbulenta (k): 0,8, Taxa de dissipação específica (w): 0,8, Viscosidade turbulenta: 1
Condições iniciais	$V_x = 40 \text{ m/s}$, $V_y = V_z = 0$
Condições de contorno	$V_{\text{paredes}} = 0 \text{ m/s}$, $V_{\text{solo}} = 40 \text{ m/s}$, $V_{\text{superfície do modelo}} = 0 \text{ m/s}$, $k_0 = 0,06 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\omega_0 = 4107,5221 \text{ 1/s}$
Critério de convergência	10^{-5}

Fonte: os autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise do arrasto veicular Modelo SAE

O primeiro objetivo deste trabalho é comparar o arrasto aerodinâmico entre veículos projetados e não projetados aerodinamicamente. Partindo desta proposta e utilizando o Modelo SAE, obtemos os seguintes resultados presentes na Tabela 4 para arrasto aerodinâmico em função do ângulo de convergência nas simulações realizadas, admitindo que o ângulo de convergência igual a 0°, representa um veículo não trabalhado aerodinamicamente e os demais ângulos representam veículos trabalhados aerodinamicamente.

Tabela 4 - Valores obtidos através da simulação realizada no tunel de vento computacional para o modelo SAE

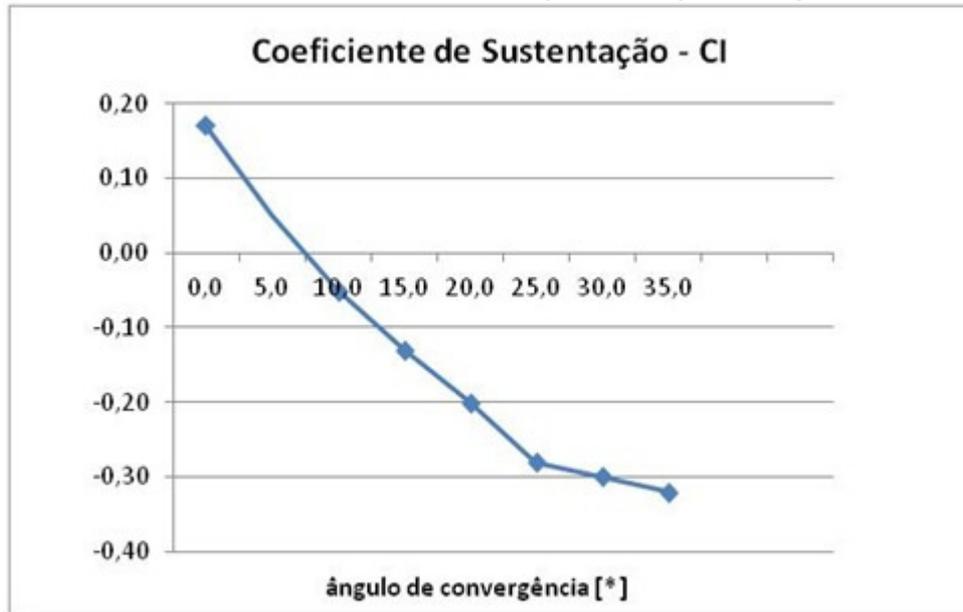
Ângulo de convergência Graus	Sustentação [N]	Cl n.a.	Arrasto [N]	Cd n.a.	Momento de Arfagem [N.m]	CP n.a.
0	18.8	0.162	-51.7	-0.445	-15.3	-0.277
10	-6.1	-0.052	-38.3	-0.330	-17.2	-0.443
15	-15.4	-0.133	-39.7	-0.342	-22.2	-0.520
20	-24.0	-0.206	-42.4	-0.365	-26.3	-0.539
25	-30.9	-0.266	-45.2	-0.390	-29.5	-0.539
35	-37.4	-0.322	-47.1	-0.406	-33.4	-0.556

Fonte: os autores

Os sinais relativos aos valores obtidos na simulação obedecem às seguintes regras, eixo x positivo direcionado para a frente do protótipo, eixo y para a direita e eixo z para baixo. O momento de arfagem é positivo quando o mesmo tende a elevar a traseira do veículo.

Afim de melhorar o entendimento dos valores indicados na Tabela 4, foram montados os gráficos das colunas 3, 5, 6 e 7 em função do ângulo de convergência do modelo. Portanto, o gráfico 1 que representa o coeficiente de sustentação (Cl), o gráfico 2 que representa o coeficiente de arrasto (Cd), o gráfico 3 que representa o momento de arfagem (MP) e o gráfico 4 que representa o centro de pressão (CP), ambos em função do ângulo de convergência do modelo.

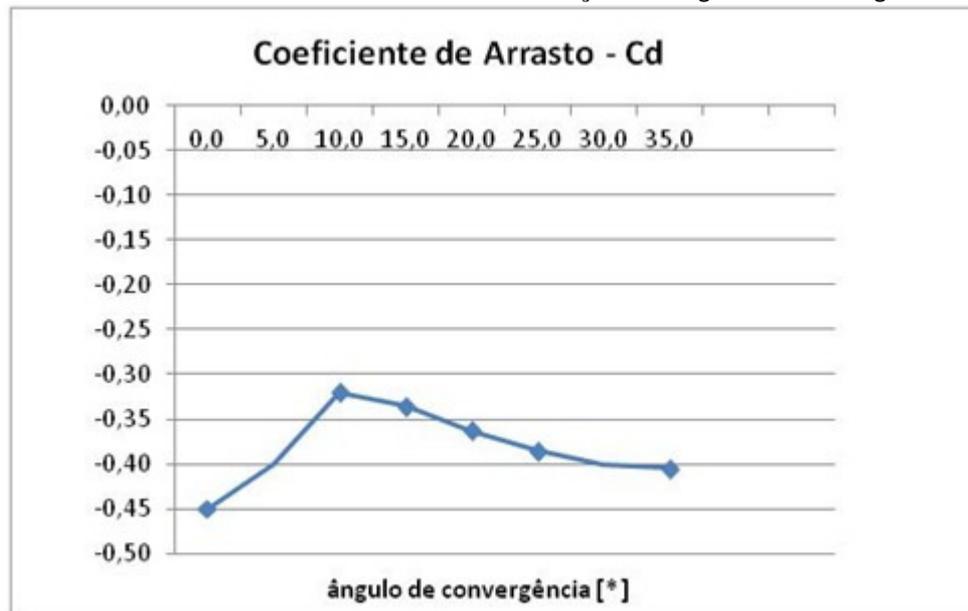
Gráfico 1 - Valores dos coeficientes de sustentação em função do ângulo de convergências



Fonte: os autores.

De acordo com o gráfico acima, dentre os ângulos simulados, pode-se observar o aumento do coeficiente de sustentação quase linearmente com o acréscimo do ângulo de convergência. A partir desta análise, desprezando os demais coeficientes aerodinâmicos, é possível afirmar que adotando ângulos de convergência maiores, obtém-se valores mais elevados de *down-force*, condição que proporciona pressão o veículo contra o pavimento, característica necessária em carros de alta performance, visto que essa característica proporciona aos veículos maior velocidade em curva, tornando o veículo mais estável em retas de altas velocidades, porém, aumentando-se o coeficiente de sustentação do modelo.

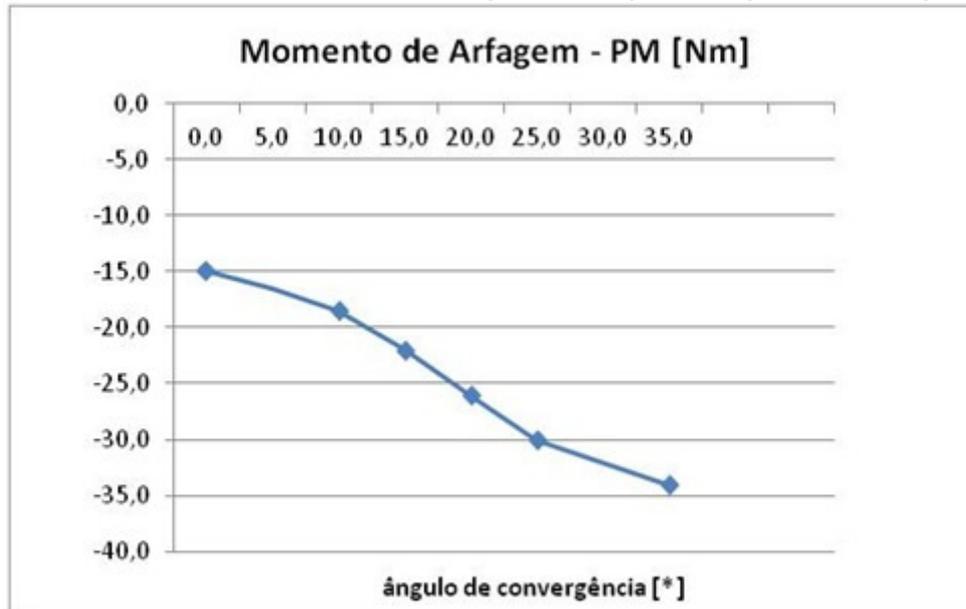
Gráfico 2 - Valores dos coeficientes de arrasto em função do ângulo de convergência



Fonte: os autores.

Através do gráfico acima pode-se observar que dentre os ângulos simulados, o valor igual a 10° foi o qual apresentou a maior redução de coeficiente de arrasto, em torno de $-0,325N$, e a partir deste ângulo os valores foram aumentando ligeiramente até atingir aproximadamente $-0,4N$ para o ângulo de 35° . O ângulo igual a 0° , considerando este como o não projetado aerodinamicamente, foi o qual apresentou o maior valor de coeficiente de arrasto, $-0,450N$. A partir desta análise é possível afirmar que, desprezando os demais coeficientes aerodinâmicos, para um veículo construído no Modelo SAE com intuito de obter uma superfície com um coeficiente de arrasto mais reduzido, melhor performance aerodinâmica, menor consumo de combustível e maior velocidade final, deve ser adotado o ângulo de convergência igual a 10° .

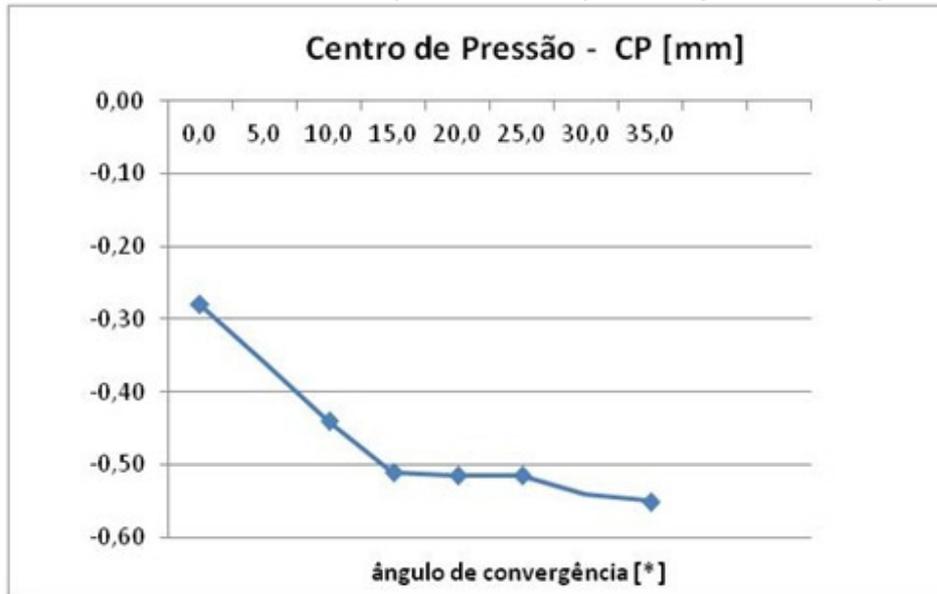
Gráfico 3 - Valores dos momentos de arfagem em função do ângulo de convergência



Fonte: os autores

Considerando como positivo o momento que tende a suspender a parte dianteira e rebaixar a traseira do modelo, pode-se afirmar que conforme é elevado o ângulo de convergência maior é o momento de arfagem que tende a suspender a parte traseira do veículo, visto que os valores crescem negativamente. Analisando o efeito desse momento na prática, desprezando os demais coeficientes aerodinâmicos, é possível entender que em uma curva, por exemplo, o carro terá uma elevada pressão na dianteira e reduzida na traseira, fazendo com que o mesmo tenha uma tendência a sair de traseira.

Gráfico 4 - Valores de centro de pressão em função do ângulo de convergência



Fonte: os autores

De acordo com o gráfico acima é possível perceber que o centro de pressão é deslocado para a parte posterior do veículo à medida que se aumenta o ângulo de convergência do modelo. O centro de pressão é responsável por tornar uma região mais importante na manutenção da dirigibilidade, e associado ao momento de arfagem negativo com o acréscimo do ângulo de convergência, como analisado anteriormente, pode se entender como a redução da estabilidade e dirigibilidade de um veículo.

4.2 Análise do arrasto veicular Modelo SAE Híbrido fastback

O Modelo SAE Híbrido fastback apresentou a seguinte curva para os valores de coeficientes de arrasto em função do ângulo de inclinação do capô durante os ensaios no túnel de vento.

Tabela 5 - Valores de coeficiente de arrasto em função do ângulo de inclinação do capô.

Ângulo de convergência do capô (°)	Coefficiente de arrasto
35	-0.475
45	-0.460
55	-0.450
65	-0.435

Fonte: os autores

De acordo com a tabela acima é possível perceber que os valores de coeficientes de arrasto reduzem quando se aumenta o ângulo de inclinação do capô, e obtendo um valor mínimo de aproximadamente 0,435 para um ângulo de 65°.

4.3 Comparação dos resultados dos modelos SAE, Híbrido fastback e convencional

Analisando os resultados dos coeficientes de arrasto entre os dois modelos estudados, é possível afirmar que o Modelo SAE apresenta valores inferiores para os ângulos de convergência estudados quando comparado com o Modelo SAE Híbrido *fastback*. Porém ambos apresentam um valor inferior ao apresentado por modelos sem um formato aerodinâmico trabalhado que apresenta em médio um valor de coeficiente de arrasto em torno de 0,7.

Isso representa um avanço nos projetos veiculares que ao reduzir os coeficientes de arrasto dos automóveis promovem, redução de consumo de combustível e impacto ambiental, e aumentam a dirigibilidade, conforto e satisfação dos usuários.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu o entendimento da importância do ramo de estudos automobilísticos voltados para a aerodinâmica veicular. É fato que superfícies veiculares projetadas aerodinamicamente, sejam elas em protótipos de alta performance ou em automóveis comerciais, permite que características aerodinâmicas desejadas possam ser alcançadas, tais como, redução do coeficiente de arrasto, proporcionando redução de consumo de combustível, aumento do coeficiente de sustentação, gerando estabilidade e conforto veicular.

Tendo em vista o cenário atual de sustentabilidade e respeito ao meio ambiente, fica como proposta de trabalho futuro, encontrar e relação existente entre os ângulos de construção dos veículos com a redução no coeficiente de arrasto e em seguida determinar quanto pode ser economizado em combustível através do investimento nas superfícies aerodinâmicas.

6 REFERÊNCIAS

ANSYS FLUENT 12.0/12.1 **Documentation Files, Theory Guide**, parágrafos 1,2,3,4,15,18,19,20.

CASTEJON, D.V., **Métodos de Redução do Arrasto e seus Impactos sobre a Estabilidade Veicular**. 1. Ed. São Carlos, 2011.

CONTRAOVENTO. World Wide Web: <http://contraovento2.blogspot.com/2009/11/aerodinamica.html>. Acesso em 20 Set 2019.

DAMY. World Wide Web: <https://damyautocenter.com.br/blog/conheca-o-primeiro-carro-do-mundo/>. Acesso em 20 Set 2019.

DESPACHANTE. World Wide Web: <https://despachante.com/blog/carro/conheca-a-historia-do-primeiro-carro-do-mundo/>. Acesso em 20 Set 2019.

FRANKLIM. World Wide Web: http://www.fem.unicamp.br/~franklin/EM886/Exp5_arrasto.pdf. Acesso em 07 Dez 2019.

GHISLENI, L.F.P., **Sobre o Movimento de uma Bola de Tênis**, 1. Ed. Porto Alegre, 2015.

HISTORIADIGITAL. World Wide Web: <https://historiadigital.org/curiosidades/10-grandes-invencoes-de-leonardo-da-vinci/>. Acesso em 20 Set 2019.

HUCHO, W-H., JANSEN, L.J., EMMELMANN, H-J, **The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles**, SAE Paper No760185, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1998.

KATZ, J., Aerodynamics of Race Cars, Annual Review of Fluid Mechanics, 2006.38: 27-63. LE GOOD, GEOFFREY M. and GARRY, KEVIN P., **On the Use of Reference Models**.

SOCIVIEWS. World Wide Web: <https://www.sociviews.com/tag/rumpler/>. Acesso em 20 Set 2019.

THEOLDMOTOR. World Wide Web: <http://theoldmotor.com/?p=153296>. Acesso em 20 Set 2019.

VALE, TEIXEIRA, FERREIRA, Estudo da diminuição do arrasto aerodinâmico e do consumo de combustível de uma geometria veicular. AEDB Seget. p.16.